

## РАДИОАСТРОНОМИЯ И АСТРОФИЗИКА

DOI: <https://doi.org/10.15407/rpra22.04.247>

УДК 520.274; 520.8

PACS numbers: 95.55.Jz,  
95.75.Kk

В. А. ШЕПЕЛЕВ<sup>1</sup>, А. А. КОНОВАЛЕНКО<sup>1</sup>, О. А. ЛИТВИНЕНКО<sup>1</sup>,  
Е. А. ИСАЕВА<sup>1</sup>, Р. В. ВАЩИШИН<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Радиоастрономический институт НАН Украины,  
ул. Мистецтв, 4, г. Харьков, 61002, Украина  
E-mail: [shep@ri.kharkov.ua](mailto:shep@ri.kharkov.ua)

<sup>2</sup> Полтавская гравиметрическая обсерватория  
Института геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины,  
ул. Мясоедова, 27/29, г. Полтава, 36029, Украина

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ЦИФРОВЫХ ПРИЕМНИКОВ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЯХ СЕТИ УРАН

*Предмет и цель работы: Целью работы является повышение эффективности интерферометрических исследований источников космического излучения на дециметровых волнах.*

*Методы и методология: Наблюдения в сети интерферометров УРАН проводятся, как правило, на частотах 20 и 25 МГц с регистрируемой шириной полосы 250 кГц. Приемники УРАН обеспечивают эффективную программную фильтрацию помех при записи и устранение избыточности сохраняемой информации. Последующая синхронизация и корреляция данных, вычисление функций видности и определение угловой структуры исследуемых объектов выполняется с помощью пакета программ, разработанных для УРАН. Предложено существенно расширить частотный диапазон наблюдений и увеличить количество одновременно регистрируемых частотных каналов, используя для записи сигналов цифровые приемники DSPZ. Из записанных в диапазоне частот от 8 до 32 МГц сигналов затем программно может быть выделен ряд более узких полос. Последующая фильтрация узкополосных помех, сокращение разрядности и дальнейшая обработка данных выполняется с помощью программного комплекса УРАН.*

*Результаты: Для реализации данного подхода разработано программное обеспечение для выделения узких полос из широкополосного сигнала с преобразованием форматов хранения данных и метода синхронизации DSPZ к виду, используемому при записи информации в приемниках УРАН. Проведены наблюдения квазара 3C380 на интерферометре УРАН-2 с базой 153 км с одновременной записью сигналов приемниками DSPZ и УРАН. При этом проверены надежность синхронизации данных на пунктах интерферометра, эффективность алгоритма автоматического удаления помех в низкочастотной части дециметрового диапазона, совпадение результатов полученных с помощью DSPZ и УРАН. В работе также проанализирована возможность расширения полосы частотных каналов регистрируемых данных для повышения чувствительности наблюдений. Приведены факторы, ограничивающие ширину полосы на дециметровых волнах, отмечены условия, в которых возможно ее увеличение.*

*Заключение: Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения приемников DSPZ для интерферометров УРАН. Показана гибкость предложенного подхода, позволяющая увеличить количество частот наблюдения для повышения точности определения моделей угловой структуры источников, расширить диапазон частот и повысить чувствительность исследований.*

*Ключевые слова: интерферометр, дециметровый диапазон, цифровой приемник, узкополосные помехи*

#### 1. Введение

В радиоастрономических наблюдениях сигнал на выходе антенн определяется суммой излучения от наблюдаемого объекта и фонового излучения различной природы. На дециметровых волнах уро-

вень этого сигнала определяется галактическим фоном, мощность которого, как правило, существенно превышает плотность потока излучения исследуемых дискретных радиоисточников. Лишь некоторые объекты, такие как спорадическое излучение Солнца и Юпитера, континуальное излучение нескольких наиболее мощных радиогалактик и остатков сверхновых, обладают мощностью,

© В. А. Шепелев, А. А. Коноваленко, О. А. Литвиненко,  
Е. А. Исаева, Р. В. Ващишин, 2017

превышающей уровень фона на выходе радиотелескопов УТР-2 и УРАН Радиоастрономического института НАН Украины. Динамический диапазон такой суммы сигналов мал, что могло бы существенно упростить конструирование усилительно-приемного тракта радиотелескопов и регистрирующей аппаратуры. Однако уровень сигналов помех различного вида, особенно в низкочастотной части декаметрового диапазона, зачастую существенно превышает уровень космического радиоизлучения, что вынуждает использовать в усилительном тракте антенн и во входных цепях приемных устройств каскады с большим динамическим диапазоном, а также предъявляет высокие требования к разрядности аналогово-цифровых преобразователей (АЦП) регистрирующей аппаратуры. Это, в свою очередь, повышает требования к быстродействию цепей передачи данных и емкости устройств накопления информации.

Одним из способов борьбы с такой избыточностью является ограничение полосы регистрируемых сигналов. Примером такого подхода служат приемники, разработанные для сети интерферометров УРАН [1]. В них частотный диапазон принимаемых сигналов декаметрового диапазона ограничен снизу значением 18 МГц, чтобы удалить часть наиболее мощных помех искусственного происхождения. После однократного преобразования частоты полоса принимаемых сигналов с помощью полосового фильтра промежуточной частоты ограничивается до 500 кГц, и такой сигнал, содержащий существенно меньшее количество помех и, следовательно, имеющий меньший динамический диапазон, подается на АЦП. В этом случае достаточно 8-разрядных АЦП, что вместе с довольно узкой полосой оцифровываемых сигналов значительно снижает поток регистрируемых данных. Последующая обработка сигналов, в том числе удаление помех с частотным разрешением около 100 Гц, производится программно в режиме реального времени. При этой обработке выполняется также дальнейшее ограничение полосы сигналов до 250 кГц и, поскольку большая часть помех устранена и динамический диапазон сигналов предельно мал, производится уменьшение разрядности сигналов до двух бит на отсчет, что еще больше снижает требования к емкости накопителей. Такое решение, наряду с его простотой и дешевизной, имеет и отрицательные стороны. Используемый прием-

ник регистрирует сигналы в довольно узкой полосе на фиксированной рабочей частоте, и наблюдения на других частотах должны проводиться последовательно или с использованием дополнительных комплектов оборудования. К тому же при необходимости расширения полосы принимаемых сигналов, например для увеличения чувствительности, потребуется существенная модернизация оборудования.

Иной подход реализован в цифровых приемниках DSPZ [2], которыми в настоящее время оснащен радиотелескоп УТР-2. Эти устройства имеют широкополосный тракт, охватывающий всю принимаемую радиотелескопом полосу сигналов от 8 до 32 МГц, и использование 16-разрядных АЦП является прямым решением для достижения линейности в условиях большого количества помех, присутствующих в этой полосе. Одним из режимов работы этих приемников является т. н. “waveform” – прямая запись оцифрованных входных сигналов. Хотя регистрация сигналов в столь широкой полосе с высокой разрядностью существенно увеличивает поток регистрируемых данных и повышает требования к емкости устройств хранения информации, в то же время этот режим работы приемников весьма универсален и может использоваться в различных программах наблюдений, в том числе и для интерферометрических исследований.

## 2. Задачи и методы

Для приемников сети УРАН разработаны комплекс программного обеспечения, служащий для проведения наблюдений, корреляции полученных записей, определения функций видности, моделирования угловой структуры источников, а также согласованные с ним форматы данных, используемые при регистрации, обработке и хранении информации. Внедрение приемников DSPZ в интерферометрические исследования требует разработки аналогичного программного обеспечения либо адаптации существующего к новым требованиям. Определим вначале цели и способы использования этих приемников.

Как известно, чувствительность радиотелескопа при регистрации континуального излучения определяется шириной полосы принимаемых сигналов, и естественно было бы использовать DSPZ для повышения чувствительности. Однако в ра-

диоинтерферометрии существует ряд ограничений, накладываемых на применимую полосу. Одним из них является влияние среды распространения сигналов. При распространении радиоволн в ионизированной среде, в дополнение к задержке, задаваемой геометрией база–источник, возникает зависящая от частоты дифференциальная задержка, определяемая разностью электронной концентрации на путях распространения сигнала от источника к пунктам интерферометра. Она определяет зависящий от частоты сдвиг фазы между сигналами двух пунктов, что вызывает растущую с увеличением полосы декорреляцию принимаемых сигналов. Наличие в ионизированной среде магнитного поля приводит к повороту плоскости поляризации волны, зависящему от частоты. Разница электронной концентрации на путях распространения дает дифференциальный поворот плоскости поляризации в двух пунктах интерферометра, который обычно учитывается с помощью ортогональных вибраторов, используемых в радиотелескопах УРАН. Однако его частотная зависимость приводит к непараллельности векторов поля на разных участках принимаемой полосы частот и уменьшает значение функции видности, измеряемое интерферометром.

Такие искажения особенно существенны в декаметровом диапазоне, так как набег фазы в ионизированной среде пропорционален квадрату длины волны. Наибольший вклад здесь вносит ионосфера Земли. Оценки, проведенные с помощью действующего оборудования УРАН, показали, что оба этих эффекта могут ограничивать допустимую ширину полосы значением около 1.5 МГц, которое может увеличиваться при больших флуктуациях электронной концентрации [1]. Отметим, что расширение полосы приемников для интерферометров УРАН не является особенно актуальным, так как достигнутая при полосе 250 кГц чувствительность позволяет исследовать несколько сотен радиоисточников и довольно часто ограничивается эффектом спутывания.

Другим ограничением, накладываемым на полосу, является геометрия база–источник. При изменении частоты наблюдения изменяется длина базы интерферометра, выраженная в длинах волн, и, следовательно, период интерференционного колебания. Влияние конечной полосы пропускания приводит к появлению в выражении для функции видности множителя, называемого от-

кликом по полосе пропускания или функцией замыкания лепестков [3]. Его вид зависит от формы полосы пропускания и для фильтра с прямоугольной формой определяется выражением

$$R \approx \frac{\sin(\pi\Delta\nu\theta_s/(v\theta_b))}{\pi\Delta\nu\theta_s/(v\theta_b)}.$$

Аргумент этого выражения равен относительной ширине полосы  $\Delta\nu/v$ , умноженной на размер источника  $\theta_s$ , выраженный в единицах синтезированного луча  $\theta_b$ . Чтобы значение  $R$  было близким к единице, необходимо, чтобы  $\pi\Delta\nu\theta_s/(v\theta_b) \ll 1$ . В соответствии с этим условием на декаметровых волнах допустимая полоса для протяженных радиоисточников может быть ограничена сотнями килогерц, т. е. значением порядка нынешней ширины полосы приемников УРАН. В то же время это соотношение легко выполняется при исследовании очень компактных источников, когда большое значение относительной полосы компенсируется малым относительным размером объекта.

Таким образом, прямое использование приемников DSPZ для интерферометрии в широкой полосе ограничено приведенными факторами, хотя некоторое расширение полосы в ряде случаев возможно. Более важным, на наш взгляд, является иной подход к применению этих приемников. Интерферометрический комплекс УРАН, используя многоканальные приемники, работает одновременно только на двух выбранных частотах, а регистрация сигнала в полосе нескольких десятков мегагерц с помощью DSPZ с последующим вырезанием ряда более узких полос, допустимых с точки зрения приведенных выше рассуждений, эквивалентна увеличению одновременно используемых рабочих частот и, следовательно, повышению информативности исследований.

Для исследования возможностей использования DSPZ в интерферометрических наблюдениях предложено разработать программное обеспечение, позволяющее вырезать из широкополосного сигнала, записанного с помощью DSPZ, узкие частотные полосы, соответствующие приемникам УРАН, и сохранять такие данные в формате, используемом программным обеспечением интерферометров. Такой подход позволяет сохранить все предыдущие программные и методические разработки для УРАН и существен-

но ускорить внедрение DSPZ. Кроме того, описанная выше методика сокращения избыточности данных, принятая в УРАН, позволит существенно уменьшить емкость накопителей для хранения данных при массовых интерферометрических наблюдениях. Реализация такого подхода даст также возможность при необходимости расширить полосу регистрации и повысить чувствительность интерферометрических исследований простой модификацией программ обработки вместо существенной переделки приемников УРАН.

### 3. Форматы данных DSPZ и УРАН

В режиме записи waveform в приемниках DSPZ в выходные файлы \*.jds записываются оцифрованные сигналы двух каналов без предварительной обработки. Для тестирования приемника УРАН используются служебные файлы \*.itm, которые, как и \*.jds, содержат “сырые” данные сигналов двух каналов на каждой из двух рабочих частот, а формат этих файлов близок к формату данных DSPZ. Основные параметры информации, хранимой в этих форматах, приведены в табл. 1.

Несмотря на существенную разницу в полосе принимаемых сигналов и количестве информации, эти форматы имеют общие черты, которые определяются необходимостью точной синхронизации записываемой информации и ориентированностью на использование быстрого преобразования Фурье при обработке. Очевидно, что переформатирование файлов должно включать переход от широкополосного сигнала каждого регистрируемого канала к двум сигналам различных рабочих частот с полосами по 0.5 МГц, с частотой дискретизации по времени, равной 1 МГц. Кроме того, необходимо произвести понижение разрядности отсчетов с 16 до 8 байт. В интерферометрии важной процедурой является

Таблица 1. Характеристики сигналов, регистрируемых в файлах \*.jds и \*.itm

Параметр	Формат	
	*.jds	*.itm
Ширина полосы сигнала, МГц	16.5, 33	0.5
Частота дискретизации, МГц	33, 66	1
Разрядность АЦП, бит	16	8
Количество каналов	1, 2	4

синхронизация оцифровки данных на разнесенных пунктах. Для этой цели используют стандарты времени и частоты. Их шкалы времени, в свою очередь, синхронизируются с помощью GPS-приемников. В файлах \*.jds и \*.itm разными способами осуществляется временная привязка отсчетов к секундным импульсам. Поэтому переформатирование файлов включает переход на другой способ временной привязки отсчетов. Несколько отличается и сама структура файлов, а также содержание служебной информации в шапках \*.jds и \*.itm файлов.

Для выполнения этих преобразований разработана программа dsp\_transform.exe, особенности алгоритма которой подробно описаны в [4]. Результатом ее работы являются файлы \*.itm, полностью совместимые с программой регистрации данных интерферометров УРАН, которая используется для дальнейшей обработки полученных после преобразования сигналов и сокращения объема хранимой информации. В этой программе заложена возможность офлайн обработки \*.itm файлов, при которой осуществляется фильтрация, удаление помех, вычисление дополнительной информации (текущей мощности и спектра сигналов) и уменьшение разрядности отсчетов. Итоговые данные сохраняются в весьма экономном формате файлов \*.ipr, который используется для хранения информации и совместим с программным коррелятором УРАН. В дальнейшем при массовом использовании DSPZ для интерферометрических наблюдений возможно объединение программ переформатирования и обработки. Возможна также реализация таких преобразований “на лету”, без использования промежуточных форматов хранения данных.

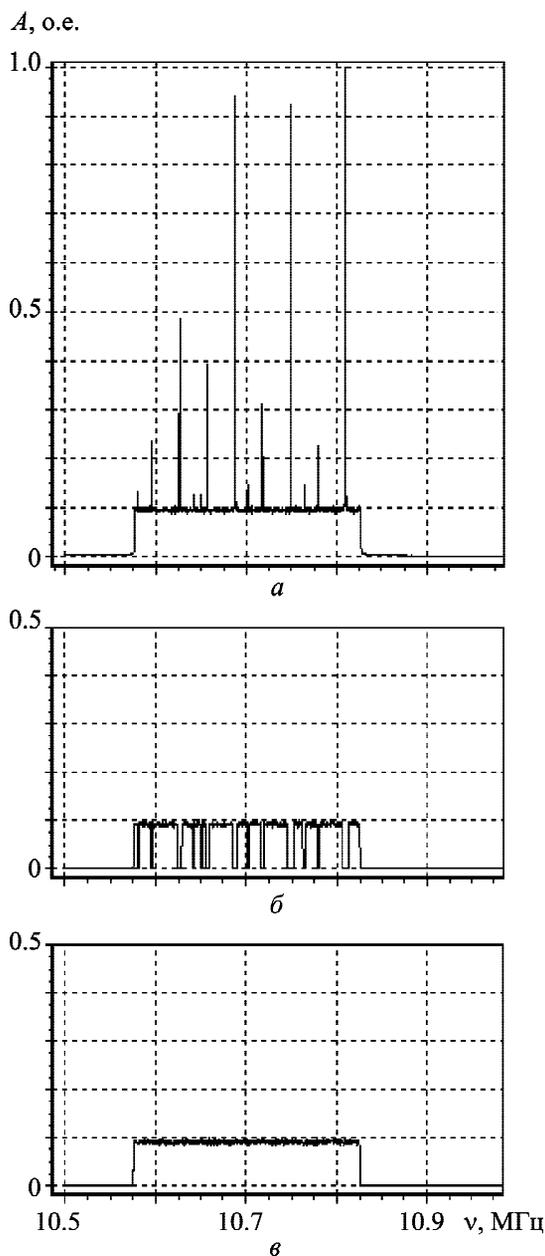
### 4. Наблюдения и обработка

Для проверки принципов, заложенных в предложенном подходе, был проведен ряд экспериментов с использованием приемников DSPZ и разработанного программного обеспечения. Осуществлялись запись и описанная выше обработка моделей сигналов различного уровня и степени когерентности, сформированных с помощью шумовых генераторов, которые позволили выбрать приемлемые параметры сигналов и усовершенствовать программу преобразования форматов. Для окончательной проверки аппаратурно-про-

граммного комплекса были проведены наблюдения радиисточника 3С380 на интерферометре с длиной базы 153 км, составленном из радиотелескопов УТР-2 и УРАН-2. Это один из наиболее интенсивных квазаров северного неба с интегральной плотностью потока на декаметровых волнах около 300 Ян. В его структуре наблюдаются компактные детали, обеспечивающие на базе УТР-2 – УРАН-2 интерференционный поток более 100 Ян. Для регистрации использовались двухканальные цифровые приемники DSPZ с частотой дискретизации 33 МГц. Это позволило записывать сигналы в диапазоне от 16 до 32 МГц, который определялся входными фильтрами приемников. С их помощью на радиотелескопе УТР-2 отдельно регистрировались сигналы с выхода антенн север-юг и запад-восток, а на УРАН-2 – информация с выходов двух антенн с ортогональными поляризациями. Именно в таком режиме радиотелескопы используются при проведении интерферометрических наблюдений. Одновременно сигналы с выходов тех же антенн записывались с помощью приемников УРАН на двух рабочих частотах 20 и 25 МГц с полосой 250 кГц в каждом канале. Целью эксперимента было сравнение данных, полученных с помощью двух различных систем регистрации, проверка работы системы синхронизации DSPZ при наблюдениях на интерферометре с длинной базой, а также демонстрация получения интерференционных откликов на наборе частот, отличных от используемых в сети УРАН. Наблюдения были проведены в ноябре 2016 г. в дневное время, так как еще одной из целей эксперимента была проверка функционирования комплекса в условиях интенсивных помех.

Ниже представлены результаты последующей обработки полученных записей. С помощью программы `dsp_transform.exe` после преобразования Фурье из полного диапазона зарегистрированных DSPZ сигналов выделена полоса 500 кГц на рабочей частоте 18 МГц, где наблюдались достаточно интенсивные узкополосные помехи. Этот участок спектра после обратного преобразования во временную область сохранен в измененном формате. Дальнейшая обработка сигналов проводилась с помощью программного пакета УРАН.

При этой обработке производилось выделение полосы 250 кГц, удаление помех и другие, опи-



**Рис. 1.** Спектры сигналов, демонстрирующие работу алгоритма очистки от помех: *а* – входной спектр, *б* – после удаления помех, *в* – после восстановления непрерывности спектра

санные выше процедуры. На рис. 1 показаны скриншоты программы, соответствующие последовательным этапам работы алгоритма очистки записей от помех. На рис. 1, *а* представлен спектр входного сигнала с помехами, на рис. 1, *б* показан результат работы алгоритма, осуществляющего подавление сигнала на участках спектра, пораженных помехами, а на рис. 1, *в* представлен

спектр сигнала, в котором пустые участки спектра, образовавшиеся после удаления помех, заполнены некоррелированным шумом для устранения переходных процессов. На горизонтальной оси показаны частоты, соответствующие промежуточной частоте приемников УРАН, а на вертикальной оси – амплитуды спектральных гармоник *A* в относительных единицах. Очищенный от помех сигнал, ввиду его малого динамического диапазона, преобразован к двухбитному формату и записан в файл \*.ipr, используемый для хранения записей в УРАН. Напомним, что этот этап обработки выполняется в режиме офлайн после записи сигналов на DSPZ, в то время как при работе приемников УРАН устранение помех и преобразование данных производится в момент записи.

На следующем этапе с помощью программного коррелятора УРАН выполнялось перемножение сигналов, записанных в двух пунктах интерферометра. Обработывались как сигналы DSPZ, преобразованные к формату УРАН, так и собственные записи приемников УРАН. Поскольку приемники УРАН были настроены на частоты 20 и 25 МГц, из широкой полосы сигналов, записанных DSPZ, были отфильтрованы полосы шириной 250 кГц с такими же центральными частотами. На рис. 2 представлен пример интерференционных колебаний (сигнал на выходе коррелятора), зарегистрированных при наблюдении 3С380 на частоте 25 МГц. На двух верхних панелях показаны сигналы, соответствующие поляризациям А и Б интерферометра, полученные с помощью приемников DSPZ, а на двух нижних для сравнения приведены такие же данные, полученные из записей УРАН. Уровни и форма сигналов совпадают с точностью до соотношения сигнал/шум записей и фазы колебаний.

И, наконец, убедившись в идентичности получаемых результатов, продемонстрируем возможность получения данных одновременно на наборе частот в диапазоне регистрации приемника DSPZ, что невозможно получить с помощью приемника УРАН. Описанная выше процедура выделения из записей DSPZ полосы частот на выбранной рабочей частоте с последующим устранением помех и сжатием данных проведена на частотах от 17.5 до 30 МГц с шагом 2.5 МГц. После такой обработки сигналов, записанных на

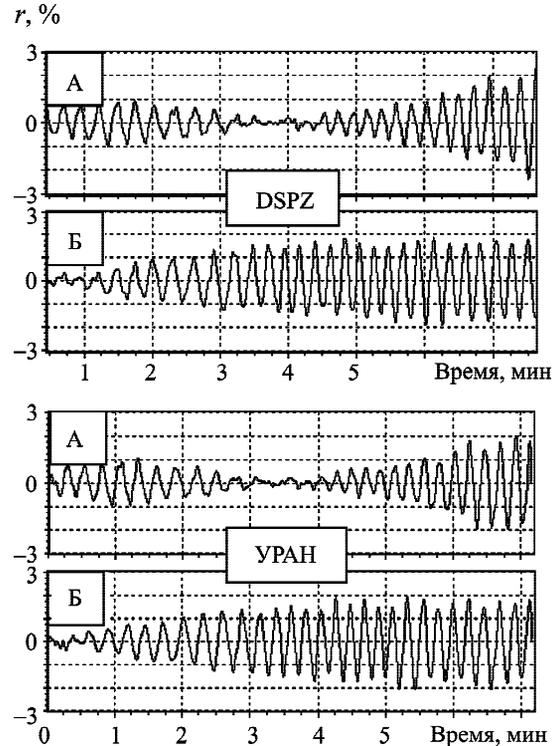


Рис. 2. Интерференционные колебания для поляризаций А и Б интерферометра УРАН-2, полученные при наблюдении 3С380 с использованием приемников DSPZ и УРАН. Рабочая частота 25 МГц. На вертикальной оси указан коэффициент корреляции сигналов *r* в процентах с одинаковым масштабом на всех панелях рисунка

телескопах УТР-2 и УРАН-2, выполнена корреляция данных и получены интерференционные колебания, показанные на рис. 3 для поляризации Б интерферометра УРАН.

## 5. Выводы

С целью ускорения внедрения широкополосных цифровых приемников декаметрового диапазона в интерферометрические исследования разработан набор программ для преобразования их форматов данных, позволяющий получить сигналы, идентичные используемым на оборудовании сети УРАН. Такой подход позволил получать данные одновременно на большом количестве рабочих частот в диапазоне работы DSPZ, используя для обработки сигналов программное обеспечение, разработанное для сети УРАН. Проведены наблюдения квазара 3С380 с одновременным использованием приемников DSPZ и УРАН, продемонстрировавшие

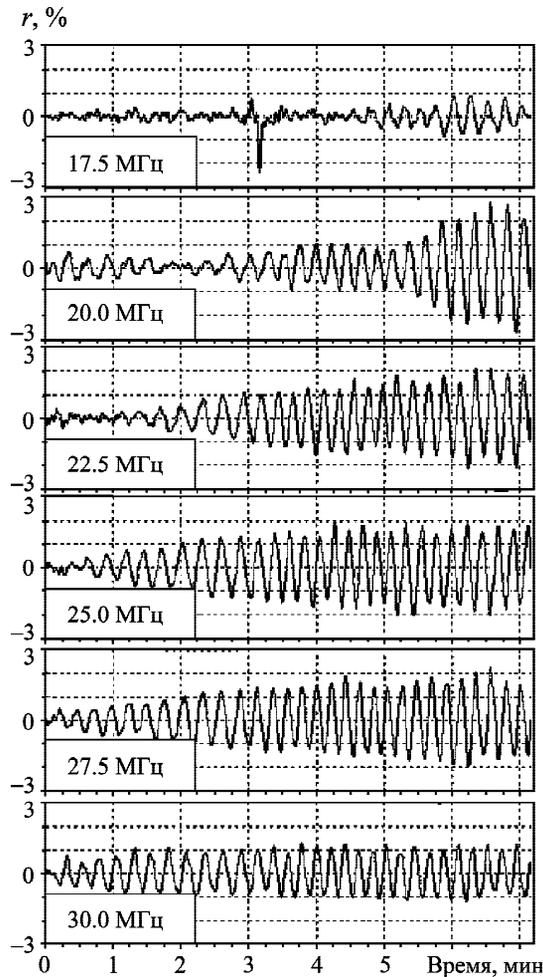


Рис. 3. Интерференционные колебания для поляризации Б интерферометра УРАН-2, полученные при наблюдении 3С380 на наборе частот в диапазоне регистрации DSPZ от 17.5 до 30 МГц

– правильность работы системы синхронизации и ее корректность при преобразовании форматов данных;

– корректную работу алгоритма очистки от узкополосных помех на низких частотах декаметрового диапазона, где велика интенсивность мешающих сигналов;

– идентичность интерференционных колебаний, получаемых с помощью приемников DSPZ и УРАН на одинаковых рабочих частотах в полосе 250 кГц;

– возможность проведения наблюдений одновременно на большом наборе рабочих частот для повышения точности определения моделей угловой структуры исследуемых источников.

Отметим, что наблюдения проводились одновременно с записью данных на оборудовании

УРАН. При этом сигналы, подаваемые на широкополосные приемники, поступали с выхода фильтров, используемых в УРАН для подавления частот ниже 16 МГц с целью понижения динамического диапазона сигналов на входе приемников. Это было одной из причин использования DSPZ в режиме регистрации половинного диапазона частот. В дальнейшем диапазон наблюдений может быть расширен в нижней части вплоть до 8 МГц, что вполне возможно, несмотря на тяжелую помеховую обстановку на этих частотах. Перспективным направлением является также расширение полосы принимаемых сигналов, которое, несмотря на приведенные в статье ограничивающие факторы, может оказаться полезным для задач обнаружения слабых компактных радиоисточников, таких как далекие радиогалактики и миллисекундные пульсары.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рашковский С. Л., Белов А. С., Иванов А. С., Лозинский А. Б., Шепелев В. А. Новый аппаратно-программный комплекс УРАН // Радиофизика и радиоастрономия. – 2012. – Т. 17, № 3. – С. 207–217.
2. Zakharenko V., Konovalenko A., Zarka P., Ulyanov O., Sidorchuk M., Stepkin S., Koliadin V., Kalinichenko N., Stanislavsky A., Dorovsky V., Shepelev V., Bubnov I., Yerin S., Melnik V., Koval A., Shevchuk N., Vasylieva I., Mylostna K., Shevtsova A., Skoryk A., Kravtsov I., Volvach Y., Plakhov M., Vasilenko N., Vasylykivskiy Y., Vavriv D., Vinogradov V., Kozhin R., Kravtsov A., Bulakh E., Kuzin A., Vasilyev A., Ryabov V., Reznichenko A., Bortsov V., Lisachenko V., Kvasov G., Mukha D., Litvinenko G., Brazhenko A., Vashchishin R., Pylaev O., Koshovyy V., Lozinsky A., Ivantyshyn O., Rucker H. O., Panchenko M., Fischer G., Lecacheux A., Denis L., Coffre A., and Griefmeier J.-M. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT // J. Astron. Instrum. – 2016. – Vol. 5, Is. 4. – id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
3. Томпсон А. Р., Моран Д. М., Свенсон Д. У. Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. – М.: Физматлит, 2003. – 624 с.
4. Isaeva E. A., Lytvynenko O. A., and Shepelev V. A. Software for adapting DSPZ receivers to the URAN interferometer network // Odessa Astronomical Publications. – 2017. – Vol. 30.

#### REFERENCES

1. RASHKOVSKIY, S. L., BELOV, A. S., IVANOV, A. S., LOZINSKIY, A. B. and SHEPELEV, V. A., 2012. The URAN's new facilities and software. *Radio Phys. Radio Astron.* vol. 17, no. 3, pp. 207–217, (in Russian).

- ZAKHARENKO, V., KONOVALENKO, A., ZARKA, P., ULYANOV, O., SIDORCHUK, M., STEPKIN, S., KO-LIADIN, V., KALINICHENKO, N., STANISLAVSKY, A., DOROVSKYY, V., SHEPELEV, V., BUBNOV, I., YERIN, S., MELNIK, V., KOVAL, A., SHEVCHUK, N., VASYLIEVA, I., MYLOSTNA, K., SHEVTSOVA, A., SKORYK, A., KRAVTSOV, I., VOLVACH, Y., PLAKHOV, M., VASILENKO, N., VASYLKIVSKYI, Y., VAVRIV, D., VINOGRADOV, V., KOZHIN, R., KRAVTSOV, A., BULAKH, E., KUZIN, A., VASILYEV, A., RYABOV, V., REZNICHENKO, A., BORTSOV, V., LISACHENKO, V., KVASOV, G., MUKHA, D., LITVINENKO, G., BRAZHENKO, A., VASHCHISHIN, R., PYLAEV, O., KOSHOVYY, V., LOZINSKY, A., IVANTYSHYN, O., RUCKER, H. O., PANCHENKO, M., FISCHER, G., LECACHEUX, A., DENIS, L., COFFRE, A. and GRIEBMEIER, J.-M., 2016. Digital Receivers for Low-Frequency Radio Telescopes UTR-2, URAN, GURT. *J. Astron. Instrum.* vol. 5, is. 4, id. 1641010. DOI: 10.1142/S2251171716410105
- THOMPSON, A. R., MORAN, J. M. and SWENSON, G. W. JR. 2001. *Interferometry and synthesis in radio astronomy*, 2nd ed. New York: Wiley. DOI: 10.1002/9783527617845
- ISAEVA, E. A., LYTVYENKO, O. A. and SHEPELEV, V. A., 2017. Software for adapting DSPZ receivers for the URAN interferometer network. *Odessa Astronomical Publications.* vol. 30.

V. A. Shepelev<sup>1</sup>, A. A. Konovalenko<sup>1</sup>, O. A. Lytvynenko<sup>1</sup>, E. A. Isaeva<sup>1</sup>, and R. V. Vashchishin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Radio Astronomy, National Academy of Sciences of Ukraine, 4, Mystetstv St., Kharkiv, 61002, Ukraine

<sup>2</sup>Poltava Gravimetric Observatory, S. Subotin Institute of Geophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, 27/29, Miasoiedov St., Poltava, 36029, Ukraine

#### USING THE BROADBAND DIGITAL RECEIVERS IN INTERFEROMETER OBSERVATIONS WITH THE URAN NETWORK

*Purpose:* The goal of the work is improving the efficiency of interferometric studies of cosmic radio sources at decameter waves.

*Design/methodology/approach:* The URAN interferometer network observations are made usually at frequencies of 20 and 25 MHz with the recorded bandwidth of 250 kHz. The URAN receivers provide an effective software filtering of interferences and reducing the redundancy of stored information during the recording. A software package developed for the URAN performs the further data synchronization and correlation, calculates the visibility functions, and determines the angular structure of studied objects. We propose to expand significantly the frequency range of observations and increase the number of frequency channels recorded simultaneously using the DSPZ digital receivers for signal recording. A number of narrower bands can then be chosen from the entire frequency range of 8 to 32 MHz of the recorded signals. The further

filtering of narrow-band interference, reduction of bit capacity and further data processing are performed with the URAN software package.

*Findings:* To implement this approach, we developed the software which singles out the narrow bands from a broadband signal and converts data storage formats and synchronization marks used in DSPZ to the form used in URAN receivers for information recording. We have observed the 3C380 quasar using the URAN-2 interferometer with the baseline of 153 km with simultaneous recording of signals with the DSPZ and URAN receivers. The data synchronization reliability at the interferometer sites, the efficiency of the interference removal automatic algorithm in a low-frequency part of the decameter range, the coincidence of the results obtained with the DSPZ and URAN were checked during observations. The paper also analyzed the possibility of expansion of the recorded data bandwidth to improve the sensitivity of observations. We considered the factors limiting the bandwidth at the decameter wavelengths and the conditions in which its expanding is possible are noted.

*Conclusions:* The results obtained demonstrate the effectiveness of using the DSPZ receivers for the URAN interferometers. The flexibility of the proposed approach increase the number of observational frequencies to improve the accuracy of determining the angular structure models of the sources, expand the frequency range of the observations and increase the sensitivity of the studies.

*Key words:* interferometer, decameter range, digital receiver, narrow-band interference

V. O. Шепелев<sup>1</sup>, О. О. Коноваленко<sup>1</sup>, О. О. Литвиненко<sup>1</sup>, Є. А. Ісаєва<sup>1</sup>, Р. В. Ващишин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Радіоастрономічний інститут НАН України, вул. Мистецтв, 4, м. Харків, 61002, Україна

<sup>2</sup>Полтавська гравіметрична обсерваторія Інституту геофізики ім. С. І. Суботіна НАН України, вул. М'ясоєдова, 27/29, м. Полтава, 36029, Україна

#### ВИКОРИСТАННЯ ШИРОКОСМУГОВИХ ЦИФРОВИХ ПРИЙМАЧІВ В ІНТЕРФЕРОМЕТРИЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕННЯХ МЕРЕЖІ УРАН

*Предмет та мета роботи:* Метою роботи є підвищення ефективності інтерферометричних досліджень джерел космічного випромінювання на декаметрових хвилях.

*Методу і методологія:* Спостереження в мережі інтерферометрів УРАН виконуються, як правило, на частотах 20 і 25 МГц з реєстрованою шириною смуги 250 кГц. Приймачі УРАН забезпечують ефективну програмну фільтрацію завад під час запису та видалення надлишковості зберезуваної інформації. Подальша синхронізація та кореляція даних, обчислення функцій видимості та визначення кутової структури досліджуваних об'єктів виконуються за допомогою пакету програм, розроблених для УРАН. Пропонується істотно розширити частотний діапазон спостережень і збільшити кількість одночасно зареєстрованих частотних каналів, використовуючи для запису сигналів цифрові приймачі DSPZ. З записаних в діапазоні частот від 8 до 32 МГц сигналів потім

програмно може виділятися низка вузьких смуг. Подальша фільтрація вузькосмугових завад, скорочення розрядності та наступна обробка даних виконується за допомогою програмного комплексу УРАН.

*Результати:* Для реалізації даного підходу розроблено програмне забезпечення для виділення вузьких смуг з широкосмугового сигналу з перетворенням форматів збереження даних і методу синхронізації DSPZ до виду, що використовується для запису інформації в приймачах УРАН. Виконано спостереження квазару 3C380 на інтерферометрі УРАН-2 з базою 153 км з одночасним записом сигналів приймачами DSPZ і УРАН. При цьому перевірено надійність синхронізації даних на пунктах інтерферометра, ефективність алгоритму автоматичного видалення перешкод в низькочастотній частині декаметрового діапазону, збіг результатів отриманих за допомогою DSPZ і УРАН. В роботі також про-

аналізовано можливість розширення смуги частотних каналів для підвищення чутливості спостережень. Наведено фактори, що обмежують ширину смуги на декаметрових хвилях, зазначено умови, за яких можливо її збільшення.

*Висновок:* Отримані результати свідчать про ефективність застосування приймачів DSPZ для інтерферометрів УРАН. Показано гнучкість запропонованого підходу, що дозволяє збільшити кількість частот спостереження для підвищення точності визначення моделей кутової структури джерел, розширити діапазон частот спостережень та підвищити чутливість досліджень.

*Ключові слова:* інтерферометр, декаметровий діапазон, цифровий приймач, вузькосмугові завади

*Статья поступила в редакцию 02.11.2017*